

心動態の解析におけるシネMRI動画像に対する オプティカルフロー解析の課題

木村 晃造* 小高 知宏** 玉川 洋一*** 小倉 久和** 石井 靖†

Problems for Optical Flow Analysis of Cardiac Motion using Cine MRI

Kozo KIMURA, Tomohiro ODAKA, Youichi TAMAGAWA,
Hisakazu OGURA, and Yasushi ISHII

(Received Aug. 31, 1994)

We have been investigating the methods to recognize and to represent cardiac motion on Cine MRI with the GRASS method and the SPAMM method. The conventional methods to analyze the moving object in the cine-image are to extract the feature on a frame of images and to trace their changes over the time series of images. In contrast to this, the optical flow analysis uses information of time-varying graduation of image more explicitly, and gets the global and frame-wide motion of the object. To detect the optical flow from the changes of graduation pattern, the object in the cine-images assumes to move like a rigid body. Therefore, in cardiac motion analysis, an optical flow field is not always equal to the motion field because of the influence of the motion of the object such as the distortion and the contraction. To analyze how these effects of the motion are appeared in the optical flow field, we model the motion modes of object, such as solid body motion mode, wavy share motion mode and wavy longitudinal motion mode, and analyze the optical flow of the time-varying test pattern by means of computer simulations.

*大学院システム設計工学専攻

**工学部情報工学科

***工学部応用物理学科

†福井医科大学放射線科

1 はじめに

近年、情報処理機器の発展を背景として、病院における医療情報は電子化して保存され、診断に利用されている。特に医用画像においてはイメージング装置の目覚ましい発展によって、超音波画像、シネアンジオグラフィー、シネ MRI (cine magnetic resonance imaging) といった動画像による診断が可能になりつつある。医用動画像の特徴として、シネアンジオグラフィーやシネ MRI によって得られる 2 次元画像の時系列、バイプレーンシネアンジオによる複数 2 次元画像の時系列、3D-MRI による 3 次元画像の時系列などのように、得られるデータの形式および画像の特性が多様であること、また、対象が心臓などのように不規則、柔軟変形物体であることなどが挙げられる [1]~[3]。

われわれは、これまで高速撮像法による医用シネ MRI 画像を用いて心筋の動態を理解し認識するために必要な解析法および動態の表現方法を検討することを目的として研究を行なってきた [4]~[8]。研究で対象としたシネ MRI 画像は、GRASS 法に SPAMM 法を組み合わせ得られる磁氣的にタグ付け (tagging) された心電図同期の多位相・多断面の心横断面像である [9],[10]。

動画像解析は、一般に、各時点での静止画 (フレーム) の画像処理的手法により特徴点を抽出し、その時間的变化を追跡することにより動きの可視化をはかる方法が採られる。しかしこの方法では、特徴点の抽出にフレーム内の空間的特性だけを用いており、フレーム間にわたる時間的な情報が利用されない。このため、動きや変形そのものの抽出、記述などに困難な課題が残されている [4],[5]。ところで、オプティカルフロー (optical flow) による動画解析は、特徴点抽出などの手法ではなく、画像全体としての動きを、各フレーム間にわたる時間的変動を積極的に利用してオプティカルフロー、すなわち速度場として表現しようとする手法である [11]~[14]。しかし、オプティカルフローは濃淡情報を用いているため、得られたオプティカルフローが実際の運動や動態における速度場をどの程度表現しているかは、あまり明確になっていない。

心横断面像にタグを付けるのは、特徴点を画像に付加することにより心動態を観察しやすくするのが目的である。しかし、実際に画像処理によってフレーム間でタグの特徴点を同定することは大変困難であり、これまではマニュアルによる同定を用いて速度場を得ることしかできていなかった。われわれは、このようなタグ付けされた画像のオプティカルフローを解析することにより、心動態がよりよく理解できるのではないかと考えているが、このようなタグのオプティカルフローに対する影響はまだ不明である。

われわれは、心臓のような柔軟変形物体の動画像におけるオプティカルフローに対して、濃淡勾配、柔軟変形運動、およびタグがどのような影響を与えるかを明らかにするために、コンピュータシミュレーションによりオプティカルフローの特性を解析した。本論文では、これまでの解析結果を中心に報告する。第 2 章では、本来の解析対象であるシネ MRI 心横断面像の特徴について述べる。さらに、用いたオプティカルフロー検出法について説明し、その検出法をシネ MRI 心横断面像に適用した結果を示す。3 章では、動態のモデルの設定とシミュレーション手法、およびそのオプティカルフロー解析の結果をまとめる。第 4 章では、考察と今後の課題について論じる。第 5 章はまとめである。なお、本研究で用いた MRI 装置は、福井医科大学に設置されている超伝導型 MRI (GE 社製 SIGNA) である。

2 シネ MRI による心動画像のオプティカルフロー

この章では、対象とした心横断面動画像についての簡単な説明と、動態解析に用いたオプティカルフロー解析の概要、およびそれを心横断面動画像に適用した結果についてまとめる。

2.1 シネ MRI による心横断面動画像の特徴

本研究の対象であるシネ MRI 画像は、すでに述べたように、GRASS 法に SPAMM 法を組み合わせて得られる磁氣的にタグ付けされた心電図同期の多位相・多断面の心横断面像である。これは、次のような方法で得られる動画像である。MRI における高速断層撮像法の GRASS 法を、心電図の R 波をトリガーとして同期させる心ゲート法に適用して、心周期に対する特定の心位相における心横断面像を得る。一連の心位相に対してこのような心横断面像を構成し、これをモニター上で短時間に繰り返し表示させると 1 心周期にわたる動画となる [9],[10]。このことからシネ MRI と呼ばれるが、これにより、心筋の動態の解析ができるのではないかと期待されている。最近の機器では複数の断面の画像データが同時に得られるから、多位相・多断面動画像となる。対象とした動画は、心筋の動態をより定量的に把握することができるよう、さらに SPAMM 法を併用して心筋に磁氣的な標識 (tag) を格子状に付加したものである。

図 1 は、このようにして撮像された、26 歳男性の健康なボランティアのもので、心臓の長軸に垂直な断面である。(a) は GRASS 法によるもの、(b) は GRASS 法と SPAMM 法を組合せてタグを付けたものである。タグは (b) で格子状の縞模様に見えるもので、心筋に固定されるため、心筋の動きとともに変形する。図 2 は、心ゲート法による一連の断層像から心筋部を中心に、 64×64 画素の大きさで切り出し、R 波からのディレイ時間順に並べたものである。(a),(b) は、それぞれ図 1 に対応している。時間の経過は左上から右下へと向かう。左上隅の像は収縮初期 (R 波から 13ms 後) のもので、以降、43ms 毎に並んだ 14 心位相を示している。タグの変形の様子から、心筋がねじれながら収縮するとともに、血流に伴うタグの消失などが見られる。また、時間経過とともに信号が減衰していることが分る。

これらの図は、MRI 装置より得られた画像データを Unix Workstation へ移送・変換し、独自に作成した X-Window 上に表示するツールで出力したものである。

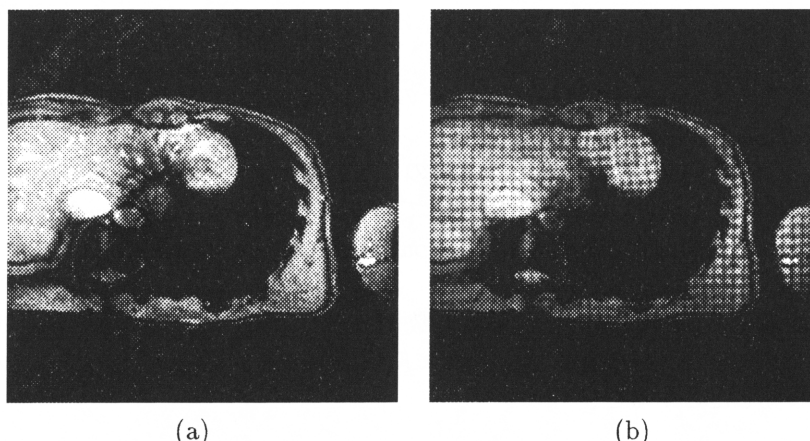


図 1 GRASS と GRASS+SPAMM の対比

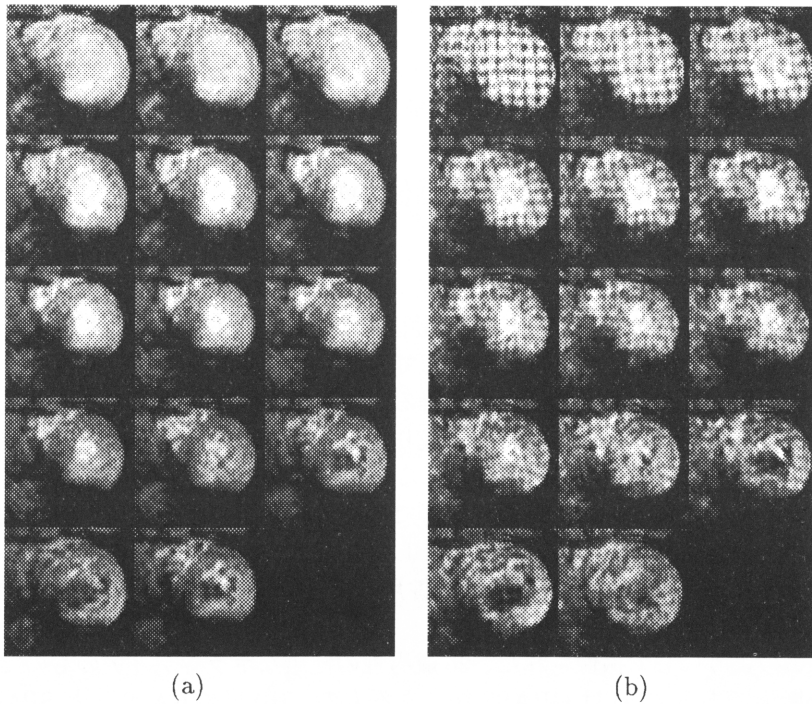


図 2 経時的变化

2.2 空間的大域的最適化法によるオプティカルフロー

われわれは、図 2 に示した各心位相の画像に対してタグの特徴抽出を行い、その変位を追跡するという方針でコンピュータプログラムによる解析を行ってきた [4],[5]。しかし、すでにふれたように、これらの局所的な動態解析の方法では、特徴点としての格子状タグのクロスポイントの認識そのものがかなり困難であるとともに、連続画像における部位同定も極めて困難であった。そこで、より大域的に画像全体の動態を理解・認識するため、オプティカルフローを用いた解析法を取り上げ検討を行なったのである。本節では、本解析で用いたオプティカルフローの計算方式について簡単に述べるが、詳細は参考文献 [11]～[14] を参照されたい。

対象がある速度でなめらかに動く場合、その対象の各点は時空間的に連続な速度場を生成する。この速度場は、動画像中の濃淡パターンの対応付けの考え方をもとに検出するのが一般的である。このようにして得られる速度場のことをオプティカルフローという。オプティカルフローを検出する手法はいくつか提案されているが、本研究では、Horn および Schunk[14] により提案された空間的大域的最適化法 (spatial global optimization) を用いた。この方法について簡単に示す。

動画像を位置 (x, y) と時間 t の画像強度関数 $f(x, y, t)$ とすると、時刻 t において位置 (x, y) にある濃淡パターンが、 δt 時刻経過した後に座標 $(x + \delta x, y + \delta y)$ へその濃淡分布を一定に保ったまま移動したとすると、

$$f(x, y, t) = f(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t) \quad (1)$$

となるが、 $\delta x, \delta y, \delta t$ が微小であるとする、

$$-f_t = f_x u + f_y v \quad (2)$$

を得る。ここで、 $(u, v) = (dx/dt, dy/dt)$ はオプティカルフローであり、添字の x, y はそれぞれの変数による偏微分係数を表す。この式はオプティカルフローの基本拘束式と呼ばれ、動画像の時間に関する勾配 f_t 、空間に関する勾配 f_x, f_y と、各点 (x, y) でのオプティカルフロー (u, v) との関係を示すものである。オプティカルフローは二成分であるから、この式だけでは決定できない。

Horn および Schunk の提案は、さらに、オプティカルフローの空間的变化を最小にするという条件、

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 \longrightarrow \min \quad (3)$$

を加え、拘束条件式 (2) の下でこの式 (3) を最小化することにより、オプティカルフローを決定する方法である。これは、次式の評価関数 E を画像全体 S で最小になるようオプティカルフローを決定することと等価である。

$$E = \int_S \{(f_x u + f_y v + f_t)^2 + \alpha^2(u_x^2 + u_y^2 + v_x^2 + v_y^2)\} ds \quad (4)$$

ここで α は式 (2) と式 (3) の相対的な重みを決定する定数である。 α を大きくすると、フローの空間変化がより滑らかになる。評価関数 E は u, v についての汎関数であるから、変分法を用いるとオイラーの方程式から次の条件式を得る。

$$\begin{aligned} f_x^2 u + f_x f_y v &= \alpha^2 \nabla^2 u - f_x f_t \\ f_y^2 v + f_x f_y u &= \alpha^2 \nabla^2 v - f_y f_t \end{aligned} \quad (5)$$

この式を Gauss-Sidel 法を用いて数値的に解き、最終的に画像上の座標 (x, y) の標本化された座標 (i, j) におけるオプティカルフローを得る。これを逐次的に解くアルゴリズムは、文献 [12] の方法に依った。

空間的大域的最適化法によるオプティカルフローは、時間的に隣り合った2つのフレームを用いて、オプティカルフローの空間的変動が小さくなるように濃淡画素を対応させ、それによって得られる各画素の推測された変位ベクトル場である。

2.3 心横断面動画像のオプティカルフロー

前節に説明したアルゴリズムを用いて、タグを付けない心横断面動画像（図2 (a)）における収縮初期の2つのフレーム（R波から56ms後とさらに43ms後のフレーム、図2 (a)の最上段左から2枚目と3枚目）を用いて得られたオプティカルフロー検出結果を図3 (a)に示す。この図より、オプティカルフローを用いることにより、心動態のベクトル場としての表現が可能になり、動いている心筋部分を中心に強いフローが現われているのがわかる。しかし、各部の動きとは矛盾するような部分も見られ、心の動態とオプティカルフローがかならずしもうまく対応しないという、これは当然予想されたことではあるが、基本的な問題がある。

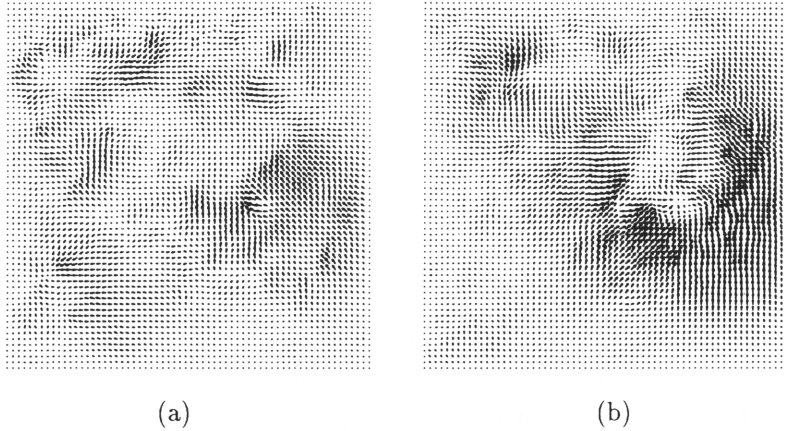


図3 シネ MRI 画像のオプティカルフロー

図3 (b) はタグを付けた心横断面動画像（図2 (b)）に対する同様のものである。これらの2つの図を比べると、タグは変位を強調するのみではなく、ややタグの形状に引きずられたフローが現れるのがわかる。

3 心動態モデルシミュレーションによるオプティカルフローの特徴解析

前章に述べたように、既存のオプティカルフロー検出アルゴリズムをシネ MRI 心動態画像に単純に適用するだけでは、動態の特徴がどのようにオプティカルフローに現われるのかを特定するのは困難である。ここでは、オプティカルフローが濃淡勾配、柔軟変形運動、タグからどのような影響を受けるのかを明確にする目的で、動態の運動モデルをいくつか定式化し、テストパターンを用いて計算機上で動態のシミュレーションを行った。そして、得られた動画像に対しオプティカルフローと動態のモデル式より計算できる変位ベクトルとの比較、検討を行うことによってオプティカルフローの特性の解析を試みる。

3.1 動態のモデル化

動態モデルの記述には、空間に固定した座標系（空間座標系）と、対象の像（濃淡パターン）に固定した座標系（パターン座標系）が必要である。このモデルでは、パターンの変動は、パターン座標系の空間座標系に対する変動として表す。空間座標系を $\mathbf{r} = (x, y) = (r, \theta)$ 、パターン座標系を $\mathbf{R} = (X, Y) = (R, \Theta)$ とする。時間は t で表す。

静止状態における濃淡像を $F(\mathbf{R})$ とすると、その像はパターン座標系の運動により、

$$f(\mathbf{r}; t) = F(\mathbf{R}) \cdot \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \mathbf{r}} \quad (6)$$

の変換を受け、時間的に変動する濃淡動画像 $f(\mathbf{r}; t)$ となる。この動画像に対するオプティカルフローやその発散、回転などを求め、各運動モードのパラメータからどのような影響を

受けるのか検討する。位置 (x, y) における 2 次元のベクトル場 \mathbf{V} についての発散 (div), 回転 (rot) は次のように計算される。

$$\begin{aligned} \text{div } \mathbf{V} &= \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} \\ \text{rot } \mathbf{V} &= \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y} \end{aligned} \quad (7)$$

(1) 剛体並進運動モード

パターン座標が並進運動を行う場合は、その速度ベクトルを $\mathbf{V} = (V_x, V_y)$ とすると、空間座標系での変位ベクトル \mathbf{r} とパターン座標系での変位ベクトル \mathbf{R} の関係は、

$$\mathbf{r} = \mathbf{R} + \mathbf{V}t \quad (8)$$

となる。当然ながら、パターンの濃淡は変化しないし、変位ベクトルの発散や回転は現れない。

(2) 波状ずれ運動モード

これは横波の運動モードである。パターン座標が波数ベクトル \mathbf{k} の方向に進行する横波運動をすると、変位ベクトル \mathbf{r} は

$$\mathbf{r} = \mathbf{R} + \mathbf{R}_T(\mathbf{r}, t) \quad (9)$$

$$\mathbf{R}_T(\mathbf{r}, t) = R_T \mathbf{e}_T \cdot \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t + \alpha) \quad (10)$$

と表わせる。 \mathbf{e}_T は \mathbf{k} に対して垂直な方向の単位ベクトルである。運動パラメータは \mathbf{k} (波数ベクトル)、 R_T (振幅)、 ω (角振動数)、 α (初期位相) である。この運動では原画像パターンの濃淡は変化せずに、形が時間的に変形する。変位ベクトル場の発散はないが、回転はある。

(3) 波状伸縮運動モード

これは縦波の運動モードであって、(2) と同様にして、

$$\mathbf{r} = \mathbf{R} + \mathbf{R}_L(\mathbf{r}, t) \quad (11)$$

$$\mathbf{R}_L(\mathbf{r}, t) = R_L \mathbf{e}_L \cdot \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t + \alpha) \quad (12)$$

と表せる。 \mathbf{e}_L は \mathbf{k} に対して平行な方向の単位ベクトルである。運動パラメータも (2) 同様である。この場合は、形状だけではなく濃淡も時間的に変動するパターン像が得られる。また、変位ベクトル場には発散が現れるが、回転は無い。

3.2 動態モデルのシミュレーションとオプティカルフロー解析

簡単なテストパターンを生成し、前節で説明した動態の各運動モードについてシミュレーションを行い、各運動モードがオプティカルフローにどのような影響を与えるか検討した。

シミュレーションで用いたテストパターンは、図 4 の (a) に示すような標準偏差が 20 画素の 2 次元ガウス分布を、(b) に示すような 46×46 画素の濃淡像に変換したものである。(c) は、その濃淡勾配をベクトルとして現わしたものである。今回用いたオプティカルフロー検出アルゴリズムは、このようなものの剛体的な運動を拘束条件としている。シミュレーションでは、このテストパターンに各運動モードを適用し、得られた時間的に近接した 2 つの画像フレームからオプティカルフローを検出することによって行なった。

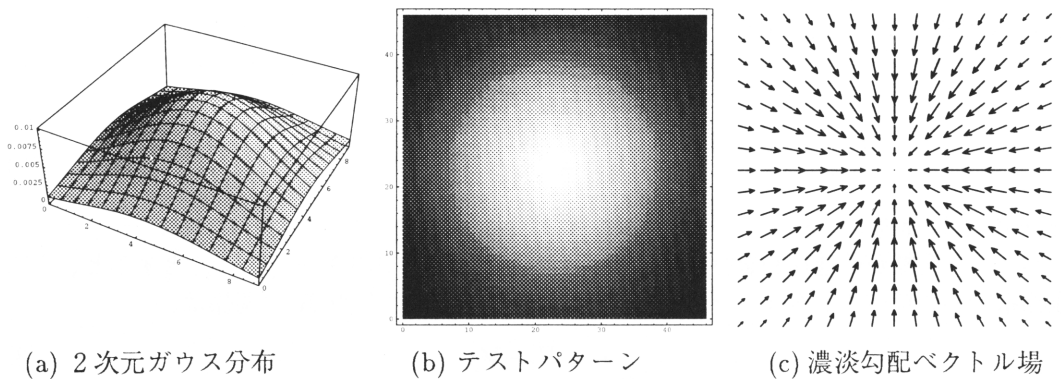


図4 テストパターンと濃淡勾配ベクトル

図5は、剛体並進運動モードのシミュレーション結果である。(a)は実際の変位ベクトル場で、2つのフレーム間では水平方向に4画素の並進移動を行なっている。(b)はオプティカルフローの検出結果である。(c),(d)はオプティカルフロー場の発散と回転である。この運動モードは剛体的運動でありオプティカルフローの仮定を満足しているにもかかわらず、濃淡勾配ベクトルの影響を強く受けている。濃淡勾配ベクトルと変位ベクトルが平行・垂直な場合は、ほぼ正しく結果が求められているが、そうでない場合、2つが合成された方向になる。また、剛体並進運動モードでは変位ベクトル場の発散と回転は無いが、オプティカルフロー場には濃淡勾配ベクトル場の影響で見掛けの発散と回転が現れる。

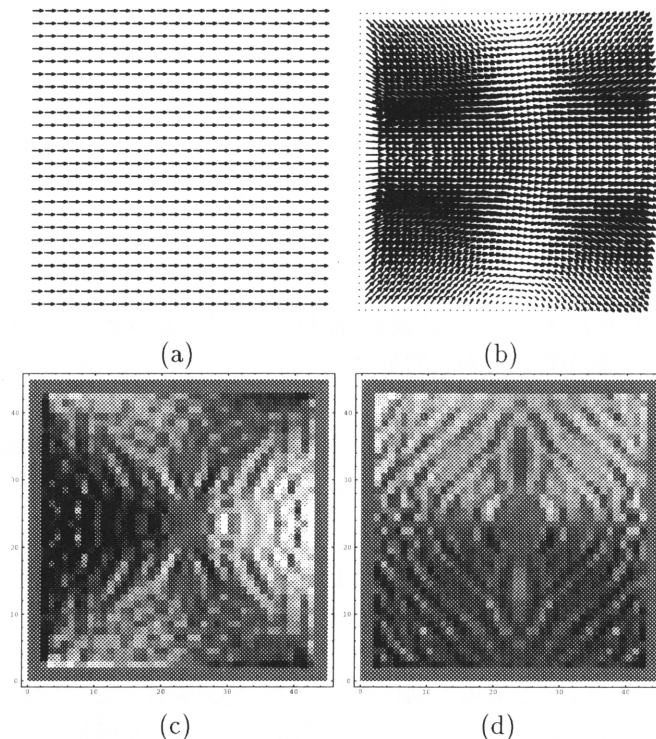


図5 剛体並進運動モードの解析結果

図6は、波状ずれ運動モードのシミュレーション結果である。(a)は変位ベクトル場、(b),(c)は変位ベクトル場の発散と回転、(d)はオプティカルフローの検出結果、(e),(f)はオプティカルフロー場の発散と回転である。(b)はゼロベクトル場である。波数ベクトル \mathbf{k} は水平方向左から右へ向き、波長は50画素、振幅は3/2画素、2つのフレームでは8画素の位相差がある。この運動モードでは濃淡の変動はないのであるが、濃淡勾配ベクトルの影響が大きく、実際の変位に対して垂直方向にオプティカルフローを生じる場合すらある。また、オプティカルフロー場には、やはり見掛け上の発散が現れ、回転も、変位ベクトル場をある程度再現しているとはいえ、かなり影響を受けて変形している。

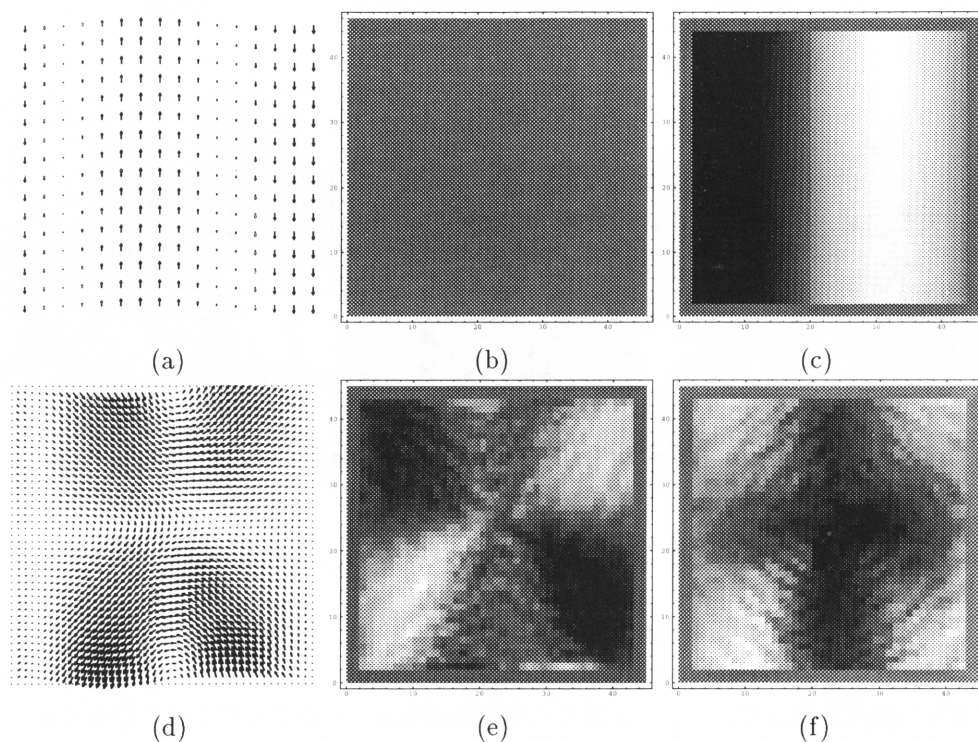


図6 波状ずれ運動モード解析結果

図7は、波状伸縮運動モードのシミュレーション結果で、(a)～(f)は図6と同様の図である。(c)はゼロベクトル場である。運動のパラメータは図6と同じように設定した。この運動モードでは、密度の変化による濃淡の変動があり、オプティカルフローが追跡することを期待している濃淡パターンそのものが変化する。よって、波状ずれ運動モードとは異なった影響を与えるものと考えられる。発散は濃淡勾配ベクトル場の影響で変位ベクトル場のものが変形を受けている。オプティカルフロー場の回転は変位ベクトル場にはないもので、見掛けのものである。

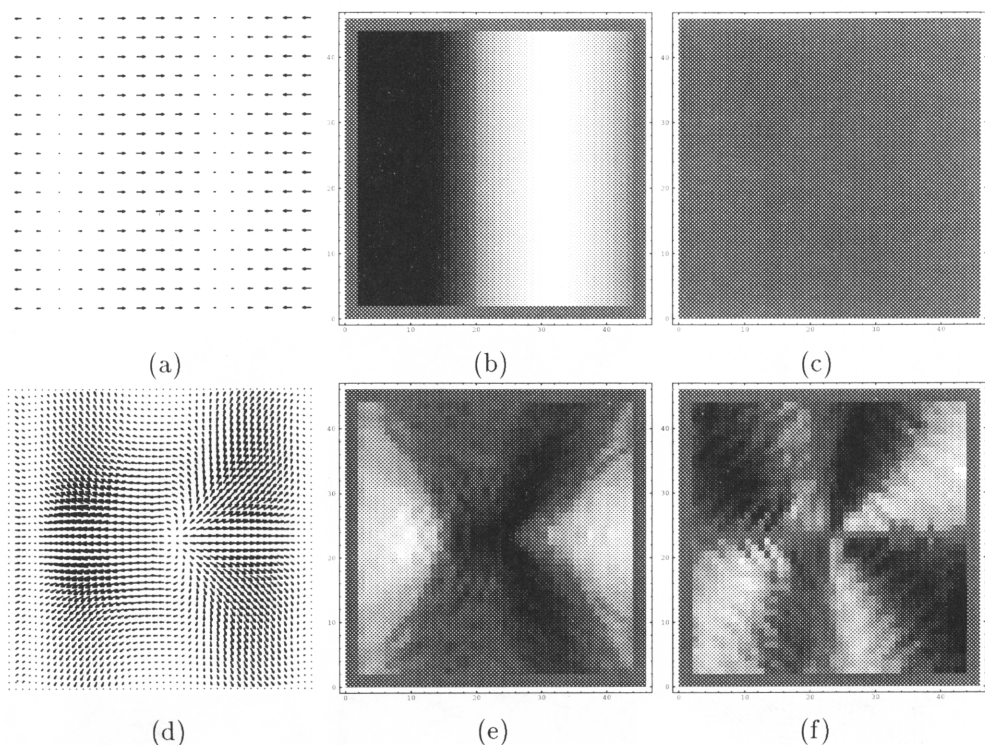


図 7 波状伸縮運動モード解析結果

4 心動態の解析におけるオプティカルフロー解析の検討と今後の課題

多くの場合、動画の時間的変化は、各フレームにおいてフィルタリングなど局所的解析法により特徴点を抽出し、フレーム間でその特徴点を追跡することによって行われる。しかし、心横断面動画では、そのような特徴点抽出は一般には困難で、人為的にタグなどの標識をつけるなどの工夫を要する。タグ付けされた画像を用いた心動態の解析では、マニュアルによる抽出と追跡が行われたのみで、フィルタリングなどの画像処理の手法を用いて、自動的に格子状タグのクロスポイントを特徴点として抽出し時間的に追跡するのはかなり困難である [4],[5]。これに対して、オプティカルフローを用いた解析によれば、比較的簡単な繰り返し演算を用いて動態を場として表現できるようになる。これにより、より巨視的な動態の特徴抽出が可能になると思われる。ところで、オプティカルフローは、その前提として物体の剛体的な運動を仮定しており、拡張、収縮、ねじれといった柔軟運動をする心筋に対しては、相反する要請である。実際、オプティカルフローは、このような柔軟運動をするような対象ではなく、パターン認識やコンピュータビジョンなどの分野において、たとえば背景中を運動する物体の認識や、逆に対象を捉えているカメラなどの視野の動きを検出する、などの目的で使われることが多い。しかし、われわれのコンピュータシミュレーションの結果によれば、心臓のような柔軟運動をする対象であっても、得られたオプティカルフローはそれなりの変位ベクトル場を再現していると思われた。しかし、当然ながら忠実に再現でき

ているわけではなく、濃淡勾配ベクトルの影響を強く受けることも見出された。

剛体並進運動モードでは濃淡の変動や発散、回転などは生じないが、画像パターンの濃淡ベクトルと変位ベクトルが平行か垂直でないところでは見かけの発散や回転が現れる。同様のことは波状ずれ運動モード、波状伸縮運動モードでも観察できた。これは2つのベクトル場の干渉の効果であるが、上のような特徴は2つのベクトル場の内積がオプティカルフローに影響を及ぼしていることを示唆していると思われる。しかし、2つのベクトル場の定量的関係はまだ解析できていない。今後の大きな課題である。

オプティカルフローは、オプティカルフロー自身がその根拠としている濃淡そのものの勾配から大きな影響を受ける。したがって、濃淡勾配に直接影響を与える格子状のタグがどのような影響を与えるか、分析する必要がある。われわれは、3章のテストパターン画像の濃度勾配を変化させたり、さらに格子状のタグパターンを重ねたりして、いくつかの動態モデルについて予備的なシミュレーションを行なった。系統的、定量的な解析はこれからであるが、その結果によれば、濃淡勾配の変化や格子状タグはオプティカルフローにかなり影響を与えることが示唆された。現在、これらに関して定量的解析を行なうことを計画している。

ところで、シネ MRI には経時的にその信号強度が弱くなるという特徴がある。これがオプティカルフローに及ぼす影響を見るためには、減衰を考慮した動態モデルを定式化する必要がある。また、心筋に特徴的な回転しながら収縮する運動がオプティカルフローでどのように捉えられるかということについても検討課題である。

本論文で用いたオプティカルフローの検出法は、時間的大域的最適化法であるが、この方法は、画像全体でのオプティカルフローの滑らかさを1つの評価としているから部分的な変動が画像全体に影響を及ぼすことがある。それを避ける方法として空間的局所的最適化法や、時間情報をより積極的に利用する時間的局所的最適化法などがあるが、心動画像に適用すると、当然ながら空間的大域的最適化法に比べてやや粗いオプティカルフローが得られる。これらの方法は、画像の部分的な動きを捉えらるのにより適したものであると考えられる。

オプティカルフローを検出する方法として、このような最適化法によらず、複数の画像フィルターを適用して決定する方法がある。これを適用すると、フィルターを工夫することによりオプティカルフローの滑らかさや局所性を損わずに検出できる可能性があり、現在シミュレーションによる解析を進めている。これについては、別報として報告する予定である。

5 まとめ

シネ MRI 心横断面像を対象にオプティカルフローによる心筋の動態解析を試みた。さらに、オプティカルフローの特性を解析するために、動態のモデリングおよびシミュレーションを行ない、得られた画像に対するオプティカルフロー解析結果の検討を行なった。その結果、オプティカルフロー解析自身がより所としている画素の濃淡そのものの勾配が、オプティカルフローに影響を与え、見掛け上の発散や回転を与えることなどの結果が示された。

参考文献

- [1] 荒木力 湯浅祐二 編、画像診断 別冊 10 「誰にもわかる MRI」、秀潤社
- [2] 核磁気共鳴医学研究会編、「NMR 医学」、丸善
- [3] 坂本捷房 監修、保坂栄弘 著、「ME 入門」、電気大出版局
- [4] 木村晃造 小倉久和 玉川洋一 石井靖、「連続 MRI 心横断像による心動態の解析」, 第 11 回医療情報連合大会, pp.245-246, 1991.
- [5] 木村晃造, 「連続 MRI 心横断像による心動態の解析」福井大学工学部情報工学科平成 2 年度卒業研究, 1992.
- [6] 木村晃造 小高 知宏 小倉久和 玉川洋一 石井靖, 「動画像シミュレーションによるオプティカルフローの特性の解析」, 平成 4 年度電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集, p306, 1993.
- [7] 木村晃造 小倉久和 玉川洋一 石井靖, 「シネ MRI 画像による心動態解析—シミュレーション画像によるオプティカルフロー解析—」, 第 13 回医療情報連合大会, pp.579-580, 1993.
- [8] 木村晃造, 「医用シネ MRI による生体の動画像理解」 福井大学大学院工学研究科平成 5 年度修士論文, 1994.
- [9] 安野直子, 他, 「心筋 tagging 法を用いたシネ MRI による心臓動態の検討」, 日磁医誌, 11(3), p159-p165.
- [10] Axel L, Dougherty L, 「MR imaging of motion with spatial modulation of magnetization」, Radiology 1989;171:841-845.
- [11] 金谷健一, 「画像理解」, 森北出版, 1990.
- [12] 三池秀敏 古賀和利 他, 「パソコンによる動画像処理」, 森北出版, 1993.
- [13] 高木幹雄, 下田陽久 監修, 「画像解析ハンドブック」, 東京大学出版、1991.
- [14] Horn B.K.P. and Schunk B.G., 「Determining Optical Flow」, Artificial Inteligence, 17(1981), pp.185-203.